

PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU HOMOGENISASI TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT PADUAN AG3NE

Hadijaya, Siti Aidah, Masrukan

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: galihway@batan.go.id

(Naskah diterima: 01-06-2018, Naskah direvisi: 10-06-2018, Naskah disetujui: 30-06-2018)

ABSTRAK

PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU HOMOGENISASI TERHADAP KARAKTERISTIK PELAT PADUAN AG3NE. Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh temperatur dan waktu homogenisasi terhadap karakteristik pelat paduan AG3NE. Paduan AG3NE merupakan paduan yang dapat digunakan sebagai kelongsong elemen bakar reaktor riset. Ingot hasil peleburan AlMgFeSi dicuplik untuk dilakukan beberapa pengujian diantaranya komposisi kimia, kekerasan, mikrostruktur, fasa, densitas dan korosi. Hasil pengujian komposisi kimia diperoleh unsur Al= 96,110%; Fe= 0,188%; Mg= 2,333 dan Si= 0,355%. Kekerasan AG3NE yang dikenai proses pendinginan cepat diperoleh sebesar 153,33 HV; sedangkan yang mengalami pendinginan lambat 72,70 HV, dan kekerasan paduan AlMgSi sebesar 79,30 HV. Hasil analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop optik menunjukkan bahwa paduan AG3NE tanpa dihomogenisasi mempunyai bentuk butir pipih sebagian berbentuk *dendrite* dengan diameter butir rata-rata 0,02 mm sedangkan paduan AG3NE yang dihomogenisasi pada temperatur 500°C dengan variasi waktu selama 1 ; 2; 3 dan 4 jam mempunyai butir dengan diameter rata-rata berturut-turut sebesar 0,01 mm, 0,02 mm, 0,03 mm dan 0,04 mm. Hasil uji fasa menggunakan XRD diperoleh fasa Al (α) dan fasa kedua FeSiAl₅ yang terdapat pada sudut 2θ sebesar 38,24° dan 44,446° dengan hkl masing-masing (119) dan (209) serta mempunyai intensitas sinar sebesar 100% dan 76,6%. Sementara itu dari hasil pengukuran densitas AG3NE diperoleh densitas rerata yang hampir sama dengan paduan AlMgSi sebagai pembanding. Densitas paduan AG3NE diperoleh sebesar $2,6893 \pm 0,0013 \text{ g/cm}^3$, sedangkan AlMgSi sebesar $2,6910 \pm 0,0283 \text{ g/cm}^3$. Sementara itu, hasil uji korosi menunjukkan bahwa laju korosi paduan AG3NE lebih rendah dibandingkan dengan paduan AlMgSi. Hasil karakterisasi komposisi kimia, kekerasan mikro, mikrostruktur, densitas dan laju korosi dapat disimpulkan bahwa paduan AG3NE dapat digunakan sebagai kandidat kelongsong bahan bakar nuklir untuk reaktor riset.

Kata kunci: Paduan AG3NE, AlMgSi, homogenisasi, karakterisasi, bahan struktur.

ABSTRACT

EFFECTS OF HOMOGENIZATION TEMPERATURE AND TIME ON THE CHARACTERISTICS OF AG3NE ALLOY PLATE. Investigation on the effects of homogenization temperature and time on AG3NE alloy plate has been done. AG3NE alloy is used as cladding material of research reactor fuel. Ingot of AlMgFeSi melt was sampled for several tests and examination such as chemical composition, hardness, microstructure, phase, density and corrosion. Composition analysis shows that the alloy is composed of Al= 96.110%, Fe= 0.188%, Mg= 2.333% and Si= 0.355%. The hardness value for AG3NE is 153.33 HV for samples treated with rapid cooling and 72.70 HV for samples treated with slow cooling. Microstructure examination with optical microscope shows that AG3NE alloy without homogenization consists of flat grains with a fraction of dendrite of 0.02 mm mean diameter, while samples homogenized at 500°C at varied temperatures of 1, 2, 3, and 4 hours consist of grains with 0.01 mm, 0.02 mm, 0.03 mm and 0.04 mm respectively. Phase analysis with X-Ray Diffractometer indicates the existence of Al (α) and FeSiAl₅ phases at 2θ of 38.24° - hkl (119) and 44.446° - hkl (209) with 100% and 76.6% intensity respectively. The measured density of AG3NE, however, is similar to that of AlMgSi as material for comparison, the values of which are $2.6893 \pm 0.0013 \text{ g/cm}^3$ for AG3NE and $2.6910 \pm 0.0283 \text{ g/cm}^3$ for AlMgSi. Corrosion rate analysis shows that the corrosion rate for AG3NE is lower than that for AlMgSi. Based on the characterization for chemical composition, microhardness, microstructure, density and corrosion rate, it is concluded that AG3NE alloy can be used as a candidate for cladding material for research reactor fuel.

Keywords: AG3NE, AlMgSi, homogenization, characterization, structural material.

PENDAHULUAN

Bahan bakar yang digunakan pertama kali untuk pengoperasian reaktor RSG-GAS adalah jenis U_3O_8/Al kemudian diganti dengan jenis U_3Si_2/Al karena mempunyai densitas lebih tinggi dari pada U_3O_8/Al ($8,41 \text{ gU/cm}^3$). Kelongsong yang digunakan sebagai pembungkus bahan bakar tersebut adalah paduan $AlMg_2$. Upaya untuk mendapatkan karakter kelongsong yang kompatibel dengan U_3Si_2/Al sebagai bahan bakar perlu dikembangkan kelongsong yang sesuai dengan bahan bakar yang digunakan. Pengembangan kelongsong diarahkan dari paduan $AlMg_2$ menjadi paduan $AlMgFeSi$ dengan pertimbangan bahwa paduan $AlMgFeSi$ mempunyai ketahanan korosi dan kekerasan lebih baik dibandingkan paduan $AlMg_2$ yang saat ini digunakan[1]. Paduan $AlMgFeSi$ atau dikenal sebagai AG3NE merupakan alternatif bahan struktur yang dapat digunakan sebagai kelongsong. Pemanfaatan paduan AG3NE sebagai kelongsong hampir sama dengan penggunaan kelongsong $AlMg_2$ maupun $AlMgSi$.

Dalam pengembangan penggunaan paduan $AlMgFeSi$ sebagai kelongsong bahan bakar nuklir perlu diketahui sifat ketahanan korosi, kekerasan, mekanik, fisik maupun termal dari paduan tersebut[2]. Oleh sebab itu dalam mendesain suatu paduan menjadi kelongsong bahan bakar perlu dipertimbangkan jenis unsur yang akan ditambahkan. Di dalam paduan aluminium unsur-unsur yang penting ditambahkan untuk memperbaiki sifat mekaniknya antarlain adalah unsur Mg, Si, dan Fe. Unsur Mg didalam paduan aluminium memperbaiki kekuatan dan keuletan hasil pengerjaan dingin, bahkan dapat memperbaiki ketahanan terhadap korosi dan mampu las. Unsur Fe akan mempertahankan butir pada temperatur tinggi karena terbentuknya fasa kedua. Pengerasan dispersi merupakan

pengerasan melalui proses memasukkan partikel-partikel dispersi dalam bentuk serbuk yang tercampur secara homogen. Partikel dispersi merupakan partikel yang tidak larut dalam matriknya. Partikel dispersi menjadi penghalang bagi gerakan dislokasi. Dislokasi semakin banyak mengakibatkan celah semakin rapat sehingga bahan akan menjadi keras. Orientasi setiap butir berbeda dengan yang lain, sehingga orientasi bidang slip pada butir-butir juga akan berbeda-beda. Oleh sebab itu pergerakan dislokasi akan terhambat. Gerakan dislokasi yang melintasi batas butir membutuhkan tegangan yang lebih besar sehingga batas butir menjadi penghalang dan menghambat gerakan dislokasi. Penguatan tekstur merupakan peningkatan kekuatan atau kekerasan melalui orientasi kristal. Jika logam paduan ingin ditingkatkan kekuatannya maka kristalnya harus memiliki orientasi tertentu. Terbentuknya fasa kedua akan memperlambat proses rekristalisasi sehingga mencegah butir tidak semakin membesar dan akhirnya menurunkan kekuatan paduan.

Sementara itu, temperatur lebur suatu bahan akan menentukan mudah tidaknya bahan tersebut melebur bila terkena panas. Aluminium dengan kemurnian tinggi mempunyai temperatur lebur lebih tinggi dibandingkan yang kemurniannya lebih rendah. Demikian pula dibandingkan dalam bentuk paduan, titik lebur paduan menurun sejalan dengan naiknya kandungan unsur pematunya sampai mencapai titik eutektiknya. Penggunaan untuk bahan kelongsong bahan bakar diharapkan mempunyai titik lebur yang tinggi agar selama digunakan di reaktor tidak mudah meleleh. Logam aluminium mempunyai titik lebur relatif sekitar 660°C masih memungkinkan karena reaktor riset beroperasi pada temperatur yang relatif rendah yakni sekitar 120°C .

Panas jenis adalah banyaknya panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur tiap gram tiap derajat Celsius

atau Kelvin. Bahan kelongsong diharapkan mempunyai harga panas jenis rendah agar secara cepat dapat memindahkan panas ke sekeliling[3]. Panas jenis (C_p) merupakan sifat termal yang juga berperan penting dalam operasi metalurgi pengecoran atau perlakuan panas karena menentukan jumlah panas yang dibutuhkan dalam proses. Hal ini berarti panas jenis mengendalikan kenaikan temperatur yang disebabkan penambahan sejumlah panas terhadap setiap gram logam[4]. Ketika logam dipasok dengan energi panas, sebagian panas akan diserap oleh kisi untuk menaikkan amplitudo getaran ion, tetapi sebagian kecil akan diserap oleh elektron-elektron pada puncak lingkaran energi.

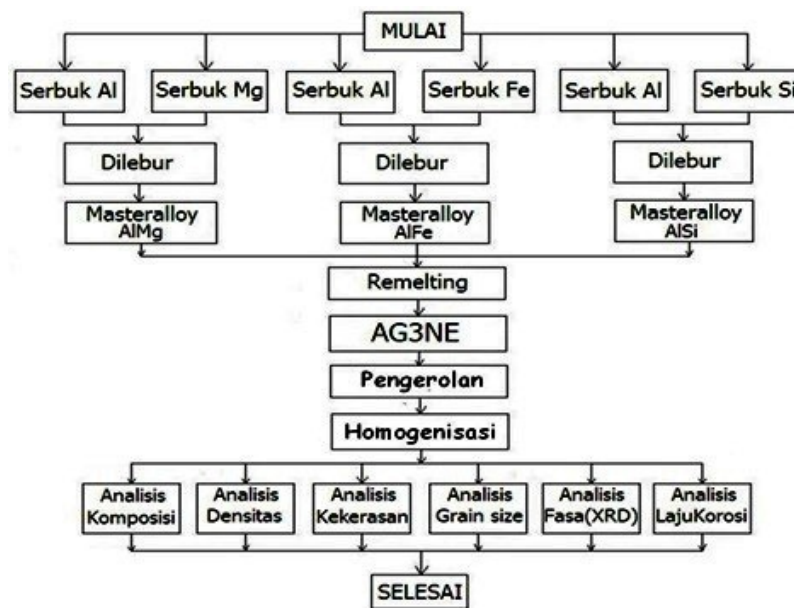
Paduan AG3NE merupakan paduan aluminium dalam kelompok seri 6xxx yang dapat digunakan untuk bahan struktur, bahan konstruksi, automotif dan jembatan. Logam paduan AG3NE mempunyai komposisi unsur utama sama dengan paduan AlMg₂ atau AlMgSi yaitu Al dan sejumlah unsur pepadu seperti Fe, Mg dan Si yang berfungsi untuk mengendalikan sifat mekanik paduan tersebut. Paduan aluminium secara umum dipilih untuk kelongsong bahan bakar disebabkan antara lain sifatnya yang ringan, ketahanan korosi baik, konduktivitas panas baik, mudah difabrikasi dan kekerasan mendekati kekerasan bahan bakar[5]. Selain itu, paduan aluminium dengan kandungan unsur pepadunya mempunyai sifat fisik, mekanik, termal dan neutronik yang baik untuk kelongsong bahan bakar.

Di dalam reaktor, kelongsong bahan bakar akan menjadi panas karena terjadi reaksi fisi antara bahan bakar U_3Si_2/Al dengan neutron. Panas yang disebabkan oleh reaksi fisi tersebut harus segera dipindahkan ke air pendingin agar tidak terjadi akumulasi panas yang menyebabkan *swelling* bahan bakar. Pemindahan panas tersebut sangat dipengaruhi oleh sifat termal dari bahan kelongsong tersebut yakni konduktivitas panasnya dan panas

jenisnya[6]. Oleh sebab itu pada penelitian ini dipelajari mengenai pengaruh temperatur dan waktu homogenisasi terhadap karakteristik pelat paduan AG3NE.

METODOLOGI

Bahan baku ingot Al ditambah unsur pepadu Mg dan Si (dalam bentuk Al-Si) dimasukkan ke dalam tungku lebur. Ingot Al dan Si dimasukkan terlebih dahulu kemudian setelah kedua unsur tersebut melebur pada 800°C dimasukkan Al dan ditambahkan *degasser* untuk mengusir gas dan *flux* untuk menghilangkan kotoran. Hasil peleburan diperoleh ingot AlMgFeSi, kemudian dilakukan pencuplikkan untuk dianalisis komposisi menggunakan alat Spektrometer Serapan Atom (AAS). Apabila dari uji komposisi kimia telah memenuhi persyaratan kelongsong bahan bakar reaktor riset maka dilanjutkan dengan proses homogenisasi, namun bila tidak memenuhi persyaratan sebagai kelongsong bahan bakar maka dilakukan peleburan ulang. Penelitian diawali dengan penyediaan bahan *base alloy* yaitu aluminium *granule* dan serbuk Si, Mg, Fe kemudian dilebur pada temperatur 800°C selama 120 menit sambil dilakukan pengadukan, kemudian dituang ke dalam cetakan. Setelah itu ketiga *master-alloy* *diremelting* bersama *base-alloy* hingga diperoleh paduan AG3NE. Paduan AG3NE selanjutnya diroll panas pada 500°C dan dihomogenisasi dengan melakukan pemanasan pada temperatur 400, 500 dan 600°C. Paduan hasil pengerolan dikarakterisasi meliputi mikrostruktur (*grain size*), kekerasan (*microhardness*), komposisi kimia (OES), fasa (XRD), laju korosi (potensiostat) serta densitas (*ultrapycnometer*). Hasil karakterisasi paduan AG3NE akan dibandingkan dengan karakteristik paduan AlMgSi yang selama ini digunakan sebagai bahan kelongsong elemen bakar reaktor riset. Secara menyeluruh langkah penelitian dilakukan seperti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian pembuatan paduan AG3NE.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Analisis komposisi kimia

Hasil analisis komposisi unsur kimia terhadap paduan AG3NE dan unsur pengotor menggunakan *Optical Emission Spektrometer* (OES) ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa komposisi unsur yang digunakan dalam pembuatan paduan AG3NE (direncanakan) terdiri dari kandungan unsur Mg 2,78%, Fe 0,26%, Si 0,15% dan Al 96,81%. Berdasarkan hasil pengujian komposisi paduan AG3NE menggunakan emission spektrometer diperoleh hasil yang tidak jauh berbeda. Kandungan Fe pada awalnya sebesar 0,26%, tetapi dalam paduan AG3NE hanya 0,0081%. Hal ini terjadi kemungkinan karena hilang atau terbang

pada saat proses pengadukan. Sementara itu, kandungan Mg pada awalnya sebesar 2,78% namun setelah proses peleburan yang dihasilkan hanya 0,0057%. Hal ini disebabkan karena sifat Mg yang mudah teroksidasi dan ketika kontak dengan temperatur tinggi pada 800°C sangat sedikit yang mengalami ikatan intermetalik dengan unsur aluminium, sedangkan kandungan Si pada awalnya sebesar 0,15% dan hasil analisis yang diperoleh sekitar 0,1196%. Hasil analisis ini tidak mempunyai perbedaan yang signifikan. Sementara itu, adanya unsur pengotor kemungkinan disebabkan karena hasil peleburan AG3NE berkontak langsung dengan cetakan yang terbuat dari batu tahan api, alat pengaduk dan adanya debu dalam *chamber* pada saat *furnace* digunakan.

Tabel 1. Komposisi unsur pemuad dalam paduan AG3NE

Unsur	Kandungan awal yang ditambahkan dalam paduan (%)	Hasil analisis (%)	Persyaratan kelongsong[5]
Al	96,81	96,110	base
Fe	0,26	0,188	0,30
Mg	2,78	2,333	1,7-2,4
Si	0,15	0,355	0,30
Pengotor	-	1,014	-

b. Kekerasan mikro

Hasil analisis kekerasan mikro AG3NE yang dianalisis ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data kekerasan mikro AG3NE

KodeSampel	Kekerasan HVN
AG-Q	153,33
AG-A	72,70
AlMgSi (pembanding)	79,30

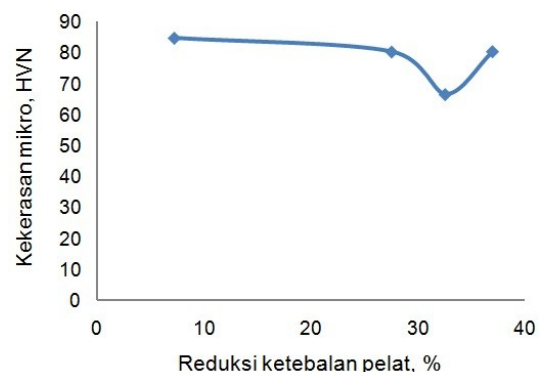
Keterangan :

1. AG-Q adalah sampel AG3NE hasil pendinginan cepat (*quenching*)
2. AG-A adalah sampel AG3NE hasil pendinginan lambat (*aniling*)

Tabel 2 menunjukkan bahwa paduan AG3NE setelah mengalami proses peleburan dan dikenai dengan proses pendinginan cepat mempunyai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan AG3NE yang dibuat melalui pendinginan lambat. Paduan AG3NE yang diperoleh melalui pendinginan cepat mempunyai kekerasan 153,33 HV sedangkan paduan AG3NE yang diperoleh melalui pendinginan lambat mempunyai kekerasan 72,22 HV. Sementara itu, kekerasan paduan AlMgSi sebagai sampel pembanding mempunyai kekerasan sebesar 79,30 HV. Perbedaan kekerasan ini disebabkan karena paduan AG3NE yang didinginkan secara cepat menyebabkan terjadi inti-inti yang lebih banyak dan dengan meningkatnya temperatur inti-inti tersebut tumbuh menjadi butir sehingga terbentuk butir yang lebih banyak. Terbentuknya butir yang lebih banyak juga terjadi pertumbuhan butir yang mengarah ke arah pusat pengintian sehingga membentuk butir dengan struktur *dendrite*. Oleh karena paduan AG3NE yang mengalami pendinginan cepat mempunyai butir yang lebih banyak sehingga kekerasan paduan tersebut menjadi lebih tinggi. Semakin banyak butir yang terbentuk menyebabkan semakin sulit dislokasi bergerak sehingga

kekerasan paduan menjadi meningkat. Apabila diamati dari tingkat kekerasannya, paduan AlMgSi yang mempunyai kekerasan sebesar 79,30 HV merupakan paduan yang diperoleh melalui proses peleburan dengan pendinginan lambat. Kekerasan suatu paduan ditentukan oleh unsur pemuatan dan perlakuan terhadap paduan tersebut. Unsur pemuatan yang ditambahkan membentuk fasa kedua atau presipitat sedangkan perlakuan (panas, mekanik atau termomekanik) akan menentukan besar butir yang terbentuk pada paduan tersebut. Semakin banyak fasa dan butir yang terbentuk semakin keras paduan logam yang terjadi, demikian sebaliknya[7].

Hasil kekerasan mikro paduan AG3NE setelah mengalami perlakuan panas yaitu dihomogenisasi pada temperature 500°C dan dirol pada tingkat reduksi yang bervariasi ditampilkan pada Gambar 2.

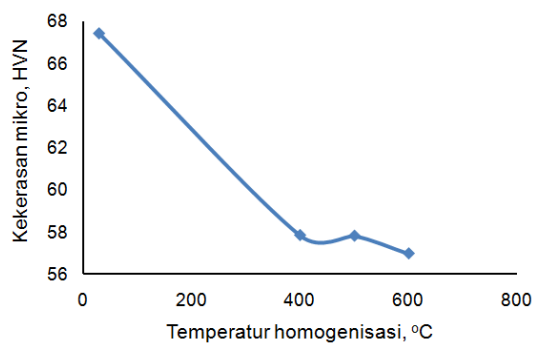


Gambar 2. Kekerasan mikro pelat AG3NE hasil dihomogenisasi pada 500°C

Gambar 2 menunjukkan bahwa pada reduksi pengerolan yang semakin besar tidak menyebabkan perubahan kekerasan paduan AG3NE secara signifikan. Pada pengerolan dengan reduksi sebesar 7,22% paduan AG3NE mempunyai kekerasan sebesar 84,73 HV kemudian setelah dirol dengan tingkat reduksi sebesar 36,97% paduan AG3NE mempunyai kekerasan sebesar 80,4 HV. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi yang diberikan pada paduan AG3NE pada proses pengerolan

panas meskipun semakin tinggi ternyata tidak mempengaruhi tingkat kekerasannya. Keadaan ini disebabkan karena aluminium merupakan logam yang mempunyai energi salah tumpuk/*stacking false energy* (SFE) tinggi, sehingga deformasi pada temperatur tinggi tidak banyak memberi pengaruh.

Sementara itu, hasil pengamatan kekerasan mikro paduan AG3NE yang dihomogenisasi pada temperatur 400°C, 500°C dan 600°C ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kekerasan mikro AG3NE variasi temperatur homogenisasi.

Gambar 3 menunjukkan bahwa pada temperatur homogenisasi yang semakin tinggi diperoleh kekerasan mikro paduan AG3NE semakin rendah. Apabila dibandingkan dengan sampel AG3NE tanpa proses homogenisasi dapat diketahui bahwa paduan AG3NE yang dihomogenisasi mempunyai kekerasan mikro lebih rendah. Hal ini disebabkan paduan AG3NE yang dihomogenisasi telah mengalami perbesaran butir akibat dari proses homogenisasi tersebut. Apabila ukuran butir suatu paduan logam semakin besar maka dislokasi yang ada akan semakin mudah bergerak sehingga kekerasan paduan logam menjadi semakin rendah.

c. Analisis mikrostruktur

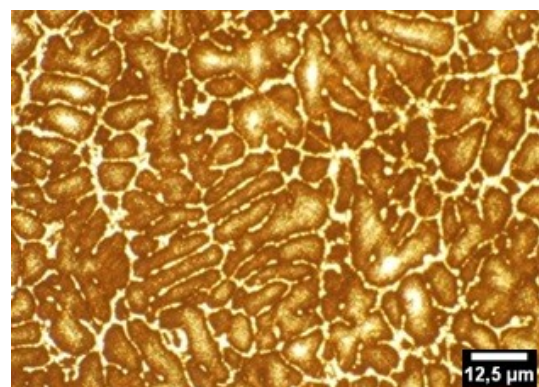
Hasil analisis mikrostruktur paduan AG3NE menggunakan mikroskop optik yang dilengkapi dengan *software* untuk menghitung butir ditampilkan pada Gambar 4 hingga 9. Hasil analisis menunjukkan

bahwa paduan AG3NE tanpa dihomogenisasi mempunyai bentuk butir pipih sebagian berbentuk *dendrite* dengan diameter butir rata-rata 0,02 mm, sedangkan untuk paduan AG3NE yang dihomogenisasi pada temperatur 500°C dengan variasi waktu selama 1 jam, 2 jam, 3 jam dan 4 jam mempunyai butir yang semakin besar dengan diameter rata-rata berturut-turut sebesar 0,01 mm, 0,02 mm, 0,03 mm dan 0,04 mm. Ukuran diameter butir paduan AG3NE dan paduan AlMgSi sebagai pembanding ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Diameter butir paduan AG3NE setelah dihomogenisasi

No.	Kode sampel	d_{rerata} (mm)
1.	AlMgSi	0,010
2.	AG3NE tanpa perlakuan	0,010
3.	AG3NE- 1 jam	0,010
4.	AG3NE- 2 jam	0,020
5.	AG3NE- 3 jam	0,030
6.	AG3NE- 4 jam	0,040

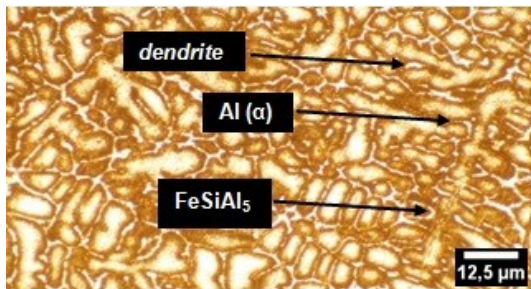
Sementara itu, paduan AlMgSi yang digunakan sebagai pembanding mempunyai bentuk butir pipih dengan diameter rata-rata sebesar 0,01 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



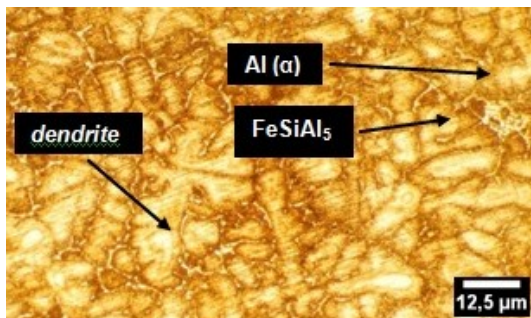
Gambar 4. Paduan AlMgSi pembanding dengan diameter rata-rata 0,01 mm.

Paduan AG3NE yang dihomogenisasi pada temperature 500°C terjadi perubahan bentuk butir yang semula pipih menjadi melebar seperti yang terlihat pada Gambar 5.

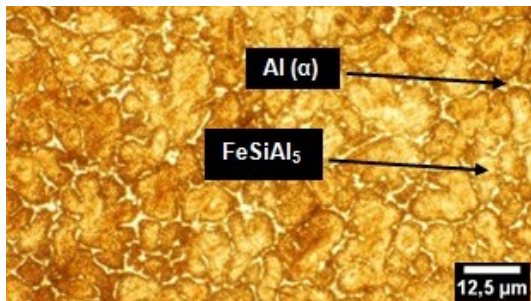
Gambar 5 dan 6 merupakan paduan AG3NE tanpa dihomogenisasi dan dihomogenisasi pada temperature 500°C selama 1jam mempunyai bentuk butir yang hampir sama dan diameter rata-rata yang sama pula yaitu sebesar 0,01 mm. Hal ini berarti bahwa proses homogenisasi selama 1 jam belum mampu mengubah besar dan bentuk butir secara signifikan.



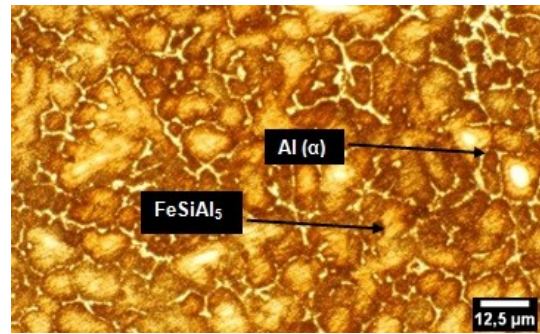
Gambar 5. Paduan AG3NE tanpa homogenisasi dengan diameter butir rata-rata 0,010 mm.



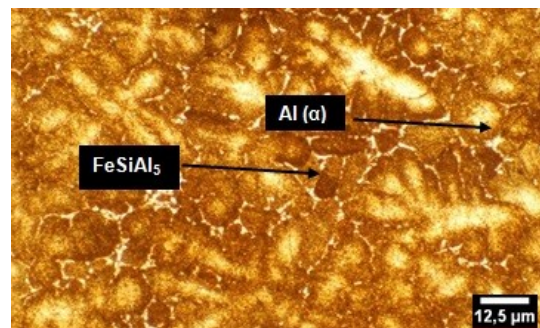
Gambar 6. Paduan AG3NE dihomogenisasi pada 500°C selama 1 jam dengan diameter butir rata-rata sebesar 0,010 mm.



Gambar 7. Paduan AG3NE dihomogenisasi 500°C selama 2 jam dengan diameter butir rata-rata sebesar 0,020 mm.



Gambar 8. Paduan AG3NE dihomogenisasi 500°C selama 3 jam dengandiameter butir rata-rata 0,030 mm.



Gambar 9. Paduan AG3NE dihomogenisasi 500°C selama 4 jam dengan diameter butir rata-rata sebesar 0,040 mm.

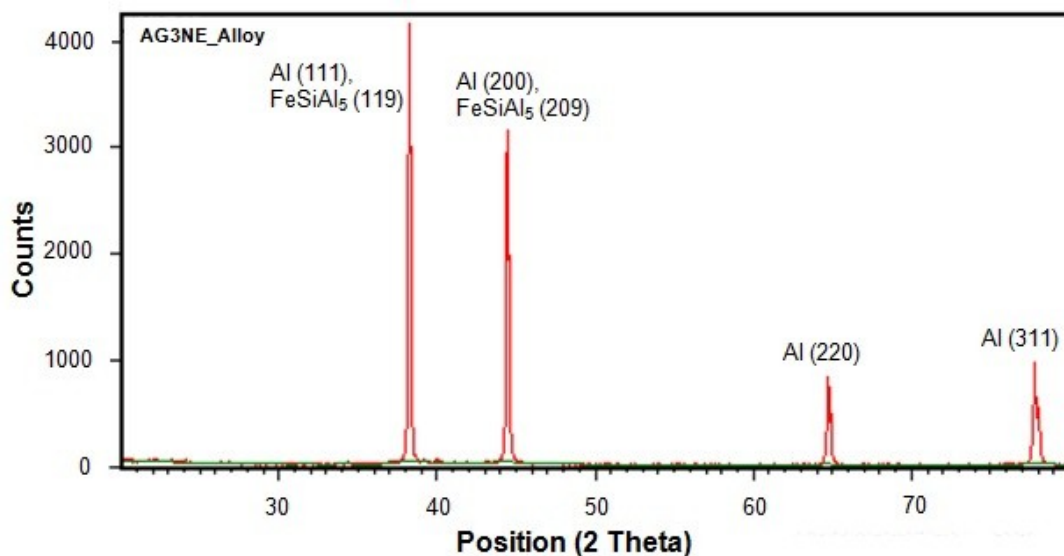
Gambar 7 hingga 9 memperlihatkan paduan AG3NE yang dihomogenisasi berturut-turut selama 2 jam, 3 jam dan 4 jam mengalami perubahan bentuk dan ukuran butir. Semakin lama waktu homogenisasi menghasilkan bentuk butir yang semakin bulat dan semakin besar. Hal ini disebabkan proses homogenisasi pada temperatur 500°C dengan waktu yang semakin lama meningkatkan jumlah panas yang diberikan kepada paduan dan mengubah bentuk butir yang semula pipih menjadi bulat dan antar butir saling bertemu sehingga menghasilkan butir yang semakin besar. Apabila dibandingkan dengan butir pada paduan AlMgSi terlihat bahwa paduan AlMgSi mempunyai bentuk butir pipih dengan ukuran butir 0,001 mm. Hal ini berarti paduan AlMgSi merupakan paduan yang diperoleh dari peleburan yang telah dirol

tanpa dihomogenisasi. Selain itu, dari analisis mikrostruktur diperoleh fasa yang terbentuk pada paduan AG3NE terdiri dari unsur Al, Mg, Fe dan Si. Dengan memperhatikan hasil uji XRD dan diagram fasa *quaterner* Al-Mg-Fe-Si dapat diperkirakan paduan AG3NE tersebut terdiri dari dua fasa yaitu fasa Al (α) sebagai matriks dan fasa kedua FeSiAl_5 [8]. Sementara itu, paduan AlMgSi yang terdiri dari unsur Al, Mg dan Si terdiri dari fasa Al (α) sebagai matriks dan fasa kedua Mg_2Si , dimana fasa-fasa di dalam paduan AlMgSi tersebut bersesuaian dengan diagram fasa *quasi binary* Al-Mg₂Si [9].

d. Analisis fasa

Hasil pengujian fasa menggunakan teknik difraksi sinar-X (XRD) dengan metode kontinyu dan sudut pengukuran pada rentang 20–80 derajat, beda potensial 40 kV dan kuat arus 30 mA ditampilkan pada

Gambar 10. Gambar 10 menunjukkan fasa Al (α) yang muncul pada sudut 2θ berturut-turut sebesar $38,24^\circ$; $44,446^\circ$; $64,7335^\circ$ dan $77,8086^\circ$ dengan hkl masing-masing adalah (111), (200), (220) dan (311) serta intensitas sinar masing-masing sebesar 100%, 76,6%, 20,35% dan 23,62 %. Fasa Al (α) merupakan fasa yang terbentuk karena adanya unsur-unsur pemadu Fe, Si dan Mg yang larut padat. Tidak terdeteksi adanya fasa kedua yang mengandung Mg bisa disebabkan oleh karena unsur Mg mudah menguap karena titik leburnya rendah sehingga pada saat peleburan, unsur Mg banyak yang telah menguap sehingga tidak membentuk fasa kedua tetapi sebagian larut padat. Selain fasa Al (α), fasa kedua yang muncul adalah FeSiAl_5 yang terdapat pada sudut 2θ sebesar $38,24^\circ$ dan $44,446^\circ$ dengan hkl masing-masing (119) dan (209) serta mempunyai intensitas sinar sebesar 100% dan 76,6% [10].



Gambar 10. Pola difraksi sinar-X paduan AG3NE

e. Densitas

Hasil pengukuran densitas paduan AG3NE ditampilkan pada Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan bahwa paduan AG3NE hasil peleburan mempunyai densitas rerata yang hampir sama dengan paduan AlMgSi sebagai pembanding. Densitas paduan AG3NE diperoleh sebesar $2,6893 \pm 0,0013$

g/cm^3 , sedangkan AlMgSi $2,6910 \pm 0,0283 \text{ g/cm}^3$. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan unsur pemadu Mg, Fe dan Si dalam paduan AG3NE maupun unsur Mg dan Si di dalam paduan AlMgSi tidak memberi pengaruh terhadap densitas akhir. Unsur Mg, Fe dan Si di dalam paduan AG3NE sebagian terlarut di dalam Al dan

sebagian membentuk senyawa/fasa kedua. Demikian pula unsur Mg dan Si di dalam paduan AlMgSi juga sebagian larut di dalam Al dan sebagian membentuk senyawa/fasa kedua. Oleh karena unsur-unsur pemuatan tersebut sebagian larut dan sebagian

membentuk fasa kedua sehingga pada pengukuran densitas yang terukur adalah densitas matrik Al. Selain itu, unsur pemuatan yang ditambahkan keduanya adalah sama yaitu Mg dan Si dan hanya berbeda Fe pada AG3NE dengan jumlah kecil.

Tabel 4. Densitas paduan AG3NE

Nama sampel	Berat sampel(g)	Rerata volume(cc)	Rerata densitas(g/cc)
Paduan AG3NE	2,5315	(0,9413 ± 0,0005)	(2,6893 ± 0,0013)
Paduan AlMgSi	4,8238	(1,7926 ± 0,0005)	(2,6910 ± 0,0283)

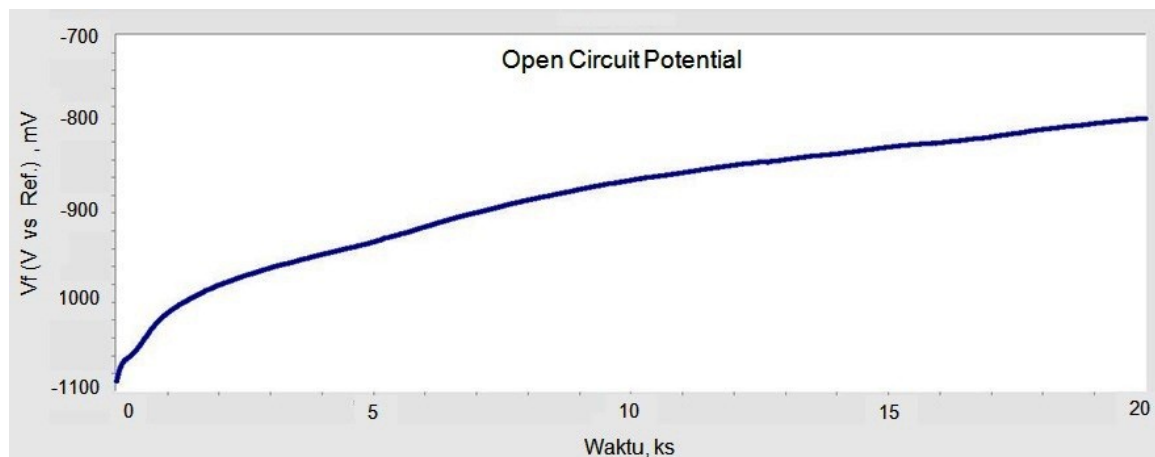
f. Laju korosi

Hasil uji korosi menggunakan alat potensiostat dan pencacahan dengan metode *polarization resistance (Polres)* dan *Tafel scan* diperoleh data laju korosi seperti pada Tabel 5 dan Gambar 11 hingga 13. Tabel 5 dan Gambar 11 hingga 13 menunjukkan bahwa ketahanan korosi paduan AG3NE sebesar 0,2102 mpy dengan metode Polres sedangkan dengan menggunakan metode Tafel ketahanan korosi sebesar 0,1577 mpy. Hasil yang diperoleh dari kedua metoda hampir sama. Apabila dibandingkan dengan paduan AlMgSi yang mempunyai ketahanan korosi

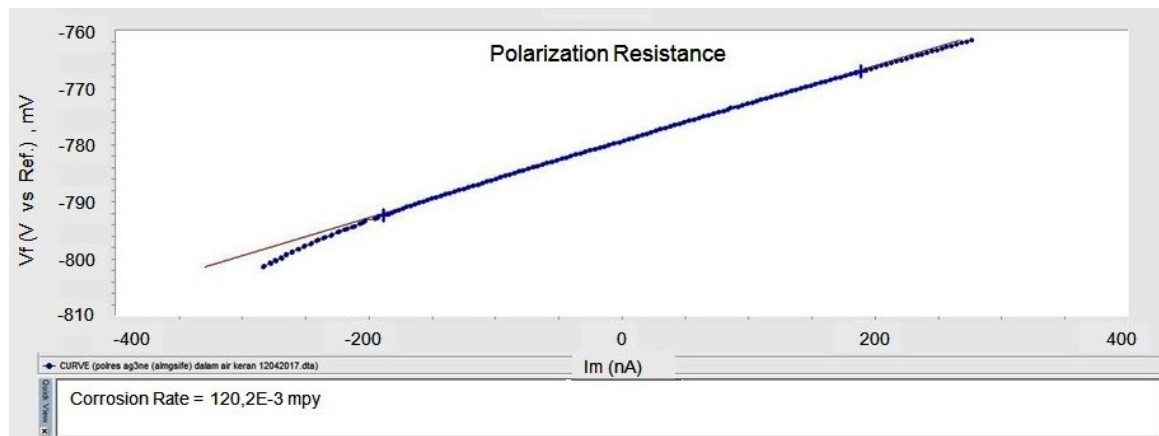
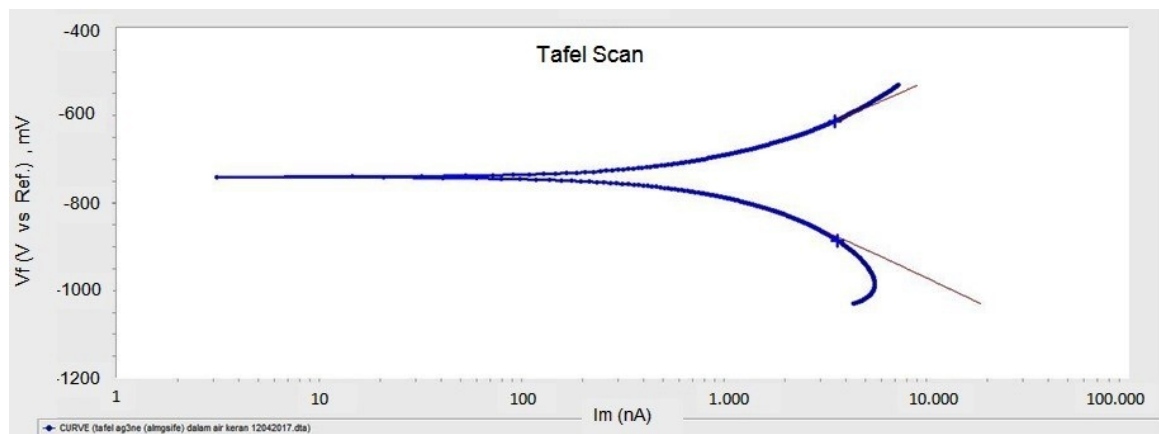
sebesar 0,1076 mpy, terlihat bahwa ketahanan korosi paduan AG3NE lebih baik. Hal ini disebabkan karena pada paduan AG3NE terdapat senyawa FeSiAl_5 sedangkan AlMgSi terdapat senyawa Mg_2Si [11]. Kedua senyawa FeSiAl_5 dan Mg_2Si mempunyai perbedaan potensial dengan matriks Al masing-masing sebesar -0,04 dan -2,38[12]. Dari perbedaan potensialnya dengan matriks Al maka FeSiAl_5 mempunyai perbedaan potensial yang lebih rendah sehingga paduan AG3NE mempunyai ketahanan korosi yang lebih baik.

Tabel 5. Data uji laju korosi paduan AG3NE

Media	Metode Polres			Metode Tafel			
	Rp (kOhms)	Icorr (Ampere)	CR (mpy)	β_a (V/decade)	β_c (V/decade)	Icorr (Ampere)	CR (mpy)
Air	66,55	$7,054 \times 10^{-7}$	0,1202	0,2102	0,02226	$9,26 \times 10^{-7}$	0,1577



Gambar 11. *Open circuit potential* paduan AG3NE

Gambar 12. *Polarization resistance* paduan AG3NEGambar 13. *Tafel scan* paduan AG3NE

SIMPULAN

Paduan AG3NE mempunyai komposisi kimia yang terdiri dari Al= 96,110%; Fe= 0,188%; Mg= 2,333% dan Si= 0,355%. Paduan AG3NE yang diperoleh melalui pendinginan cepat mempunyai kekerasan 153,33 HV, dimana kekerasan tersebut lebih tinggi dibandingkan AG3NE yang diperoleh melalui pendinginan lambat dengan kekerasan sebesar 72,22 HV. Kekerasan paduan AG3NE yang dihomogenisasi pada temperatur 500°C dan dirol pada tingkat reduksi yang bervariasi menunjukkan bahwa pada reduksi pengerolan yang semakin tinggi kekerasan paduan hanya meturun sedikit. Hasil pemeriksaan mikrostruktur paduan AG3NE tanpa dihomogenisasi mempunyai bentuk butir pipih dengan diameter butir rata-rata 0,02 mm sedangkan untuk paduan AG3NE

yang dihomogenisasi pada temperatur 500°C selama 1 jam, 2 jam, 3 jam dan 4 jam mempunyai butir yang semakin besar dengan diameter butir rata-rata sebesar 0,01 mm, 0,02 mm, 0,03 mm dan 0,04 mm. Hasil pengujian fasa menggunakan metode difraksi sinar-X (XRD) menunjukkan paduan AG3NE terdiri dari fasa Al (α) dan FeSiAl₅. Hasil pengujian densitas AG3NE menunjukkan bahwa nilai densitas AG3NE hampir sama dengan densitas AlMgSi yakni masing-masing sebesar 2,6893 g/cm³ dan 2,6910 g/cm³. Sementara itu, hasil pengujian ketahanan korosi menunjukkan bahwa ketahanan korosi AG3NE sebesar 0,2102 mpy. Hasil tersebut lebih baik bila dibandingkan dengan ketahanan korosi paduan AlMgSi yang mempunyai ketahanan korosi sebesar 0,107579 mpy. Dari hasil karakterisasi paduan AG3NE

diketahui bahwa temperatur dan waktu homogenisasi berpengaruh terhadap kekerasan mikro, mikrostruktur, fasa, densitas dan korosi, namun perubahan karakter tersebut tidak berpengaruh terhadap fungsi paduan AG3NE sebagai kelongsong bahan bakar reaktor riset.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan pada Kepala Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir dan Kepala Bidang Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir yang telah memfasilitasi penelitian ini serta teman-teman BFBBN terutama Bapak Yatno DAS, Bapak Slamet Pribadi, Ibu Mujinem dan Ibu Asminar yang telah banyak membantu sehingga penelitian dan penulisan makalah bisa terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.H. Al Hasa, "Karakterisasi sifat mekanik dan mikrostruktur paduan intermetalik AlFeNi sebagai bahan kelongsong bahan bakar," *Jurnal Teknologi Bahan Bakar Nuklir*, vol. 3 no. 2, 2007.
- [2] E. Nurlia, S. Purwadaria, E.A. Basuki, "Evaluasi pengaruh perlakuan panas RRA terhadap kekuatan mekanik dan peningkatan ketahanan SCC paduan Aluminium 7075," *Prosiding Seminar Material Metalurgi*, 2012, LIPI.
- [3] A.B.Ginting, "Analisis termal paduan AlMgSi untuk kelongsong bahan bakar U_3Si_2 -Al densitas tinggi," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 16, no 2, 2010.
- [4] S. Menargues, E. Martín, M.T. Baile, J.A. Picas, "New short T6 heat treatments for aluminium silicon alloy obtained by semisolid forming. *Journal of Materials Science & Engineering*, vol. 621, pp.236-242, 2015.
- [5] M.H. Al Hasa, "Formasi fasa dan mikrostruktur bahan struktur paduan aluminium feronikel hasil proses sintesis," *Prosiding PPI-PDIPTN 2007*, PTAPB, Yogyakarta.
- [6] A.B.Ginting, Supardjo, Yanlinastuti, D. Anggraini, Boybul, "Karakterisasi paduan AlMgSi untuk kelongsong bahan bakar U_3Si_2 /Al dengan densitas uranium $5,2 \text{ gU/cm}^3$," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 24, no. 1, hal. 27–38, 2018.
- [7] S.C. Ram, K. Chattopadhyay, I. Chakrabarty, "High temperature Tensile properties of centrifugally cast in-situ AlMg₂Si functionally graded composites for automotive cylinder block liners," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 724, pp. 84–97, 2017.
- [8] M.F. Ibrahim, S.A. Alkahtani, K.A. Abuhasel, F.H.Samuel, "Microstructural characterization of beryllium treated AlSi Alloys," *Proceeding of Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, pp.1-0.
- [9] M. Syahid, B.T. Sofyan, S.G. Basuki, B. Adam, "Characterization of Al-7Si-Mg-Cu turbine impeller produced by investment casting," *Proceeding of Advanced Materials Research*, 2013, vol. 789, pp. 324-329.
- [10] L. Sweet, S.M. Zhu, S.X. Gao, J.A. Taylor, M.A. Easton, "The effect of iron content on the iron containing intermetallic phases in a cast 6060 aluminium alloy," *Metallurgical and Materials Transaction*, vol. 42 A, 2011.
- [11] A. Dobkowska, B. Adamczyk-Cieślak, J. Mizera, K.J. Kurzydłowski, A. Kielbus, "The comparison of the microstructure and corrosion resistance of sand cast aluminum alloys. *Proceeding of Arch. Metall. Mater.*, vol. 61, no 1, pp. 209–212.
- [12] A. Kruglova, "Influence of Microstructure on Mechanical Properties and Damage Characteristics of Al-Si Alloys," *Disertation of Doctor at Saarlandes University*, 2017.